

КОРОЧКІН Олександр

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-6569-5849>

e-mail: avcora@gmail.com

МЕЛЬНИК Назар

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0000-3572-1578>

e-mail: na.melnyk@kpi.ua

ІНФОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ФАКТОРІВ, ПОКАЗНИКІВ ТА КРИТЕРІЇВ ОПТИМАЛЬНОСТІ МАРШРУТІВ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ГРАФОВИХ БАЗАХ ДАНИХ

Сучасні транспортно-логістичні системи функціонують у динамічному середовищі, яке характеризується високою щільністю потоків, великим обсягом інформації та багатокритеріальністю процесів прийняття рішень. В умовах цифрової трансформації, розвитку інтелектуальних логістичних систем та необхідності адаптації до зовнішніх викликів, таких як економічні кризи, глобальні ланцюги постачання та військові дії, виникає потреба у високопродуктивних технологіях зберігання та обробки даних.

Запропонована оптимізаційна модель дозволяє визначати оптимальний маршрут транспортних перевезень з урахуванням багатокритеріального аналізу, що забезпечує баланс між витратами та позитивним ефектом.

Розроблена інфологічна модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршрутів в поєднанні з графовою базою даних дозволяє адаптивно змінювати параметри маршрутизації в залежності від динамічних змін у транспортній мережі.

Ключові слова: багатокритеріальність, оптимальність, критерій, графові бази даних, транспортні перевезення.

KOROCHKIN Oleksandr, MELNYK Nazar

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute"

INFOLOGICAL MODEL OF FACTORS, INDICATORS, AND ROUTE OPTIMALITY CRITERIA IN GRAPH DATABASES

Modern transport and logistics systems operate in a highly dynamic and complex environment, characterized by dense traffic flows, high volumes of heterogeneous information, and the necessity to make multi-criteria decisions under uncertainty. These challenges are further intensified in the era of digital transformation, where the rapid evolution of intelligent logistics systems, globalized supply chains, economic volatility, and external factors such as military conflicts or pandemics place additional demands on the adaptability and responsiveness of transport infrastructures.

In this context, there is a growing need for innovative methods and technologies that enable the storage, processing, and analysis of large-scale transport data in real time. One such solution is the integration of graph-based data models, which are particularly suitable for representing and analyzing complex transport networks due to their natural structure and ability to support flexible querying.

The paper proposes an infological model that formalizes the key factors, indicators, and optimality criteria relevant to transportation routing. This model serves as a semantic layer that connects high-level decision-making logic with the underlying data architecture. When implemented using graph databases, the model provides an efficient and scalable framework for adaptive route optimization.

By incorporating multi-criteria analysis into the decision-making process, the developed optimization approach allows for the identification of transportation routes that strike a balance between cost efficiency, delivery time, network congestion, safety considerations, and other contextual parameters. Moreover, the adaptive nature of the system enables continuous reconfiguration of route parameters in response to real-time changes in network conditions, infrastructure availability, and external disruptions.

The proposed approach enhances the resilience, efficiency, and intelligence of modern transport systems, offering a foundation for the development of decision support tools in the field of logistics and supply chain management.

Keywords: multi-criteria optimization, optimality, factor, criterion, graph database, transportation

Стаття надійшла до редакції / Received 25.03.2025

Прийнята до друку / Accepted 01.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасна транспортно-логістична система стикається з низкою викликів, пов'язаних із зростанням транспортних потоків, урбанізацією, необхідністю зниження витрат та покращення екологічних показників. Оптимізація маршрутів перевезень стає критично важливим завданням, оскільки вона дозволяє мінімізувати час у дорозі, знизити витрати на паливо, оптимізувати використання транспортних ресурсів та підвищити загальну ефективність логістичних операцій.

У сучасних умовах військового стану розподіл торговельних транспортних засобів зазнав суттєвих змін. З початком війни в Україні відбулися такі трансформації [1]:

- повітряні перевезення повністю припинилися через заборону польотів цивільної авіації;
- обсяги залізничних перевезень скоротилися на 65,3% через обмежену пропускну спроможність на прикордонних пунктах;
- значне скорочення водних перевезень через окупацію значної частини морських портів.

Зважаючи на ці обмеження, ринок транспортних послуг переорієнтувався на автомобільний транспорт, надаючи йому пріоритет для здійснення вантажних перевезень.

Обґрунтування використання графових баз даних у транспортних задачах. Оптимізація транспортних перевезень є ключовою проблемою логістики, яка впливає на ефективність роботи транспортних систем, зменшення витрат, покращення екологічних показників та забезпечення оперативного управління перевезеннями.

Традиційні реляційні бази даних мають суттєві обмеження у моделюванні складних зв'язків між об'єктами транспортної мережі, особливо при роботі з ієрархічними та графоподібними структурами. У той же час графові бази даних (Graph Databases, GDB) пропонують ефективні рішення для моделювання та аналізу складних багатозв'язних структур, що включають маршрути перевезень, дорожню інфраструктуру, транспортні вузли та взаємодію між логістичними об'єктами. У сучасних умовах, особливо в умовах воєнного стану та глобальних логістичних викликів, використання GDB стає все більш актуальним через їхню гнучкість, швидкість обробки складних зв'язків та можливість адаптації до динамічних змін у транспортних мережах.

Зокрема у дослідженні "Exploring the use of time-varying graphs for modelling transit networks"[4] автори пропонують використання GDB для моделювання динамічних транспортних мереж. Вони підкреслюють, що такий підхід дозволяє ефективно відстежувати зміни в транспортних потоках та приймати обґрунтовані рішення для покращення роботи транспортних систем.

Переваги графових баз даних у транспортних задачах:

- Гнучкість моделювання та продуктивність: Графові бази даних, такі як Neo4j, забезпечують значні переваги у гнучкості моделювання та продуктивності при побудові та управлінні логістичними ланцюгами. Це дозволяє компаніям оптимізувати свої логістичні процеси, знижувати витрати та підвищувати ефективність управління.
- Моделювання транспортних мереж: Графові бази даних ефективно використовуються для моделювання транспортних мереж, що дозволяє вирішувати оптимізаційні задачі, пов'язані з розподілом ресурсів та плануванням маршрутів. Це сприяє підвищенню ефективності транспортних систем та зниженню витрат.
- Аналіз та оптимізація транспортних потоків: Використання графових баз даних дозволяє проводити глибокий аналіз транспортних потоків, виявляти вузькі місця та оптимізувати використання транспортних артерій міста. Це сприяє запобіганню утворення заторів та покращенню загальної ефективності транспортної системи.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Науковці досліджують логістичні перевезення з різних аспектів, включаючи маршрутизацію, управління ризиками, вплив заторів та застосування геоінформаційних технологій.

Для побудови множини варіантів маршрутів у перевезеннях застосовується теорія графів. У роботі [5] формалізовано задачу побудови альтернативних маршрутів перевезень з використанням оптимізаційної математичної моделі за критерієм мінімального перевищення експлуатаційних витрат при перевезенні альтернативним маршрутом порівняно зі штатним графіковим перевезенням. Множина альтернативних маршрутів формується на основі зваженої матриці суміжності графа.

У дослідженні [6] обґрунтовано необхідність розроблення кількох варіантів маршрутів, оскільки через затримку автомобілів в заторі і зайву витрату палива транспортні компанії зазнають значних збитків. Розкрито сутність дорожніх заторів та їх багатьох негативних наслідків, таких як: марнування часу, неможливість передбачити точний час на подорож, марно витрачене пальне, забруднене повітря тощо.

У роботі [7] було визначено, що розробка розвізно-збірних маршрутів методом Кларка-Райта дозволяє отримати економічні та часові вигоди, а саме: зменшується собівартість перевезення за рахунок зменшення довжини поїздки, відповідно скорочується і час на виконання рейсів. Важливим фактором при такій маршрутизації є врахування завантаженості автомобіля, при якому буде можливим як довантаження, так і вивантаження вантажу.

Робота [8] розглядає можливість використання моделі нейронної мережі при вирішенні задачі маршрутизації перевезень вантажів та вибору виду транспорту із застосуванням змішаного методу прийняття рішення. Формування маршруту та вибір виду транспорту здійснюється із урахуванням сукупного ефекту від декількох критеріїв вибору та оцінок, вплив яких визначається методом розмитих коефіцієнтів.

У публікації [9] розглянуто специфіку транспортної логістики в умовах воєнного часу. Підприємства змушені адаптуватися, вибудовуючи нові маршрути та оптимізуючи транспортні витрати. Ключовими

завданнями залишаються забезпечення безпечних маршрутів, пошук ефективних логістичних рішень та інтеграція з європейськими транспортними мережами.

Метою роботи [10] є пошук рішення для планування маршрутів у дорожній мережі для користувача, а також знаходження рівноваги у задачі оптимізації маршрутів, де дороги мають невизначені атрибути. Концепція ґрунтується на теорії Демпстера-Шейфера та алгоритмі Дейкстри, які відповідно допомагають моделювати невизначеність та знаходити найкращий маршрут. На основі невизначених впливових факторів розраховується інтервал часу подорожі (так званий інтервал вартості) для кожної дороги. Окреслено алгоритм визначення найкращого маршруту шляхом порівняння інтервалів та використання правил ухвалення рішень, що залежать від уподобань користувача. Визначення пріоритетів серед цих правил і розроблений механізм на основі правил для урахування потреб користувачів є одним із важливих внесків цієї роботи.

Дослідження [1] акцентує увагу на процесі планування вантажних перевезень в умовах воєнного часу задля підвищення безпеки перевезень за рахунок побудови маршруту, що враховує умови воєнного стану. Застосовано підходи системного аналізу, теорії графів та багатокритеріального ухвалення рішень. У статті досліджено проблеми вантажних перевезень в умовах воєнного стану, які спричинили зростання частки автомобільного транспорту. Проаналізовано причини цього явища та потенційні ризики, що виникають під час перевезень. Визначено ключові критерії безпеки маршрутів та місць призначення в зонах бойових дій. Для оцінки рівня загроз розроблено систему індексів небезпечності, що базується на даних про частоту артилерійських обстрілів і зафіксовані випадки вибухів. Запропоновано алгоритм побудови безпечного маршруту, що адаптує алгоритм Дейкстри відповідно до критерію безпеки, використовуючи сформовані індекси ризику. Наголошено на перспективності застосування теорії графів для формування альтернативних маршрутів та багатокритеріальному оцінюванні їхньої ефективності.

Аналіз наукових публікацій свідчить про перспективність застосування теорії графів та графових баз даних для розробки альтернативних маршрутів та впровадження багатокритеріального підходу для їх оцінювання. Такі підходи дозволяють підвищити ефективність логістичних процесів та забезпечити їхню гнучкість в умовах нестабільної транспортної ситуації.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Аналіз наукових публікацій свідчить про перспективність застосування теорії графів та графових баз даних для розробки альтернативних маршрутів та впровадження багатокритеріального підходу для їх оцінювання. Такі підходи дозволяють підвищити ефективність логістичних процесів та забезпечити їхню гнучкість в умовах нестабільної транспортної ситуації.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Аналіз існуючих традиційних підходів, що використовуються для вирішення задачі пошуку оптимального маршруту перевезень, показав переважне застосування однокритеріальних моделей. Питанням формалізації оптимізаційних задач за допомогою багатокритеріальних моделей присвячено праці вченого Вороніна А. М. [11-13]. Методи розв'язку багатокритеріальних задач розглянуті в працях Писарчука О. О., Даника Ю. Г., Шестакова В. І., Харченко В. П. [14-15]. Оскільки традиційна формалізація оптимізаційної задачі в однокритеріальній формі не забезпечує вирішення комплексної задачі яка враховує багато критеріїв ефективності, доцільним є розробка рішення з формалізацією задачі вибору оптимального маршруту в багатокритеріальній формі. Традиційно воно здійснюється в такій послідовності: визначення факторів, показників та критеріїв; формування моделі вироблення рішення; інтерпретація отриманого результату.

1. Формування факторів, показників та критеріїв ефективності транспортних маршрутів.

Для того, щоб визначити критерії оптимальності маршруту, пропонується розглянути ефективність (Е) як відношення позитивного ефекту до витрат, тобто мінімізацію логістичних показників, зменшення витрат та максимізацію корисних результатів:

$$E_{\text{маршруту}} = \frac{\text{Позитивний ефект} \rightarrow \max}{\text{Витрати} \rightarrow \min} \quad (1)$$

Під час формування показників і критеріїв ефективності транспортних маршрутів було дотримано таких вимог:

1. Критерії повинні відповідати ключовим параметрам транспортної логістики, забезпечуючи оцінку ефективності маршрутів за часовими, економічними та безпековими факторами.
2. Кожен критерій має бути представлений у кількісному вигляді, що дозволяє проводити обчислення та порівняння альтернативних маршрутів.
3. Критерії враховують особливості дорожньої інфраструктури, зокрема мости, тунелі, залізничні переїзди та міські обмеження швидкості.
4. Для більшості критеріїв має бути змога отримати дані з відкритих об'єктивних джерел інформації.

У ході досліджень шляхом евристичного аналізу предметної галузі оцінювання ефективності транспортних маршрутів сформовано інфологічну модель факторів, показників та критеріїв ефективності, яка надана у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Інфологічна модель факторів, показників та критеріїв ефективності

Узагальнений показник	Критерій	Позначення	Категорія	Напрямок екстремуму
F_1	Відстань	D	Витрати	min
	Кількість залізничних переїздів	R	Витрати	min
	Час у дорозі	T	Витрати	min
	Кількість перехресть/світлофорів	X	Витрати	min
	Кількість проміжних населених пунктів	P	Витрати	min
F_2	Кількість мостів та тунелів	B	Витрати	min
	Індекс якості дорожнього покриття	Q	Позитивний ефект	max
	Середня швидкість	V	Позитивний ефект	max
	Кількість АЗС	F	Позитивний ефект	max
	Індекс безпеки	S	Позитивний ефект	max

У наведених критеріях оптимальності маршруту є конфліктні критерії. Це означає, що покращення одного критерію може призвести до погіршення іншого. Розглянемо основні конфлікти:

- Час у дорозі (T) має мінімізуватися, тобто короткий маршрут є кращим, проте вища якість дороги (Q) і безпека (S) зазвичай покращуються на довгих маршрутах (наприклад, через об'їзди, автостради).
- Більша кількість АЗС (F) корисна для далекої подорожі, але зазвичай вони знаходяться ближче до міст і населених пунктів, що може збільшити час у дорозі (T).
- Довгі маршрути можуть мати кращу якість покриття (Q) та вищий рівень безпеки (S), оскільки містять сучасні магістралі, проте мінімізація відстані (D) часто призводить до вибору менш якісних і менш безпечних доріг.

Оскільки критерії є суперечною системою – це свідчить про приведення задачі оцінювання ефективності до багатокритерійної форми. Завдання багатокритерійного оцінювання ефективності транспортного маршруту полягає в тому, що береться маршрут з найгіршими показниками і для нього проводять розрахунки, в подальшому порівнюючи їх з іншими маршрутами.

2. Формування моделі вироблення рішення.

Визначення ефективності маршруту серед множини інших полягає в зведенні переліку суперечливих часткових критеріїв таблиці 1 до узагальної оцінки. Для цього обрано нелінійну схему компромісів професора Вороніна А.М., виходячи із доведених переваг цієї схеми агрегації [12, с. 109]. Сутністю зміни значень, що описують встановлені часткові критерії (табл. 1) є дискретна форма. Тоді зазначена вище згортка матиме такий вигляд:

$$Y(y_0) = \sum_{l=1}^k \gamma_{0l} (1 - y_{0l})^{-1} \rightarrow \min \quad (2)$$

де $l = 1 \dots k$ – кількість включених у згортку часткових критеріїв; γ_{0l} – нормований ваговий коефіцієнт; y_{0l} – нормований частковий критерій оптимальності. Нормування критеріїв, що входять до згортки (2), здійснюється відносно найвищого (для тих, що мінімізуються) та найнижчого (для тих, що максимізуються) значень показників певного маршруту.

Нормування вагових коефіцієнтів здійснюється за виразом:

$$\gamma_{0l} = \frac{\gamma_l}{\sum_{l=1}^k \gamma_l} \quad (3)$$

де γ_l – поточне (ненормоване) значення вагового коефіцієнта.

Далі у межах кожної груп факторів здійснюється послідовне зведення часткових критеріїв до узагальнених за групою та до інтегрованого критерію ефективності. Так реалізується технологія вкладених згорток і забезпечується чутливість кінцевого рішення до зміни кожного з часткових критеріїв таблиці 1. Узагальнені критерії ефективності за кожною групою виглядають наступним чином (для спрощення запису прийемо в (1) вагові коефіцієнти за одиниці з позначенням нормувань критеріїв нулем):

$$\begin{aligned} F_1 &= (1 - D_{i0})^{-1} + (1 - R_{i0})^{-1} + (1 - T_{i0})^{-1} + (1 - X_{i0})^{-1} + (1 - P_{i0})^{-1} + (1 - B_{i0})^{-1} \rightarrow \\ \min \\ F_2 &= (1 - Q_{i0})^{-1} + (1 - V_{i0})^{-1} + (1 - F_{i0})^{-1} + (1 - S_{i0})^{-1} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (4)$$

У виразі (4) індекс $i = 1...N$ характеризує відповідні частинні й узагальнені критерії для різних варіантів побудови маршруту, а індексом нуль позначені нормовані критерії.

Частинні критерії нормуються відносно суми поточних значень окремо для тих, що мінімізуються (5) та окремо для тих, що максимізуються (6):

$$\mu_{0i}^{\min} = \frac{\mu_i^{\min}}{\sum_{i=1}^N \mu_{li}^{\min}} \quad (5)$$

$$\mu_{0i}^{\max} = \left(\mu_i^{\max} \times \sum_{i=1}^N \frac{1}{\mu_{li}^{\max}} \right)^{-1} \quad (6)$$

де $\max \mu_i^{\min}$, $\min \mu_i^{\max}$ – максимальні та мінімальні значення мінімізуючого і максимізуючого критеріїв на інтервалі їх розгляду.

Для визначення інтегрованої оцінки ефективності за дискретною згортою (2) із узагальнених критеріїв (4) здійснюється їх нормування відносно найгіршої оцінки (максимального значення показника, що характеризує частковий критерій). З урахуванням зазначеного інтегрована оцінка ефективності транспортних маршрутів формується таким чином:

$$I = (1 - F_{10})^{-1} + (1 - F_{20})^{-1} \rightarrow \min \quad (7)$$

Нормування узагальнених критеріїв здійснюється згідно з виразом:

$$F_{i0} = \frac{F_{i0}}{F_{\max}} \quad (8)$$

де $F_{\max}$ найгірша оцінка певного маршруту та визначається для кожного узагальненого критерію (4) і формується із найгірших (для нормованих – максимальних) значень, що описують зміну частинних критеріїв при розгляді всіх варіантів маршрутів.

Для вирахування параметру $F_{\max}$ необхідно обрахувати показники абстрактного (найгіршого) маршруту. Проводиться нормування частинних критеріїв відносно максимальних (мінімальних) значень абстрактного маршруту:

$$\mu_{0i}^{\min} = \frac{\mu_i^{\min}}{\max \mu_i^{\min} + \Delta} \quad (9)$$

$$\mu_{0i}^{\max} = \frac{\min \mu_i^{\max} - \Delta}{\mu_i^{\max}} \quad (10)$$

де $\max \mu_i^{\min}$, $\min \mu_i^{\max}$ – максимальні та мінімальні значення мінімізуючого і максимізуючого критеріїв на інтервалі їх розгляду; Δ – коефіцієнт запасу, $\Delta = 0,03$.

Оцінювання достовірності вибору оптимального маршруту здійснюється за інтегрованою оцінкою (7), нормованою відносно найгіршого варіанта маршруту відповідно до виразу:

$$I_0 = 1 - \frac{I}{\max I} \quad (11)$$

де $\max I$ вираховується відповідно до виразу:

$$\max I = \sum_{i=1}^2 (1 - [\max F_i - \Delta])^{-1} \quad (12)$$

Після нормування інтегрованої оцінки отримуємо її зміну у межах від нуля до одиниці з найвищою оцінкою – наближеною до одиниці, а найнижчою – наближеною до нуля. Рішення приймається суб'єктивно на основі приведення інтегрованої оцінки до лінгвістичної категорії відповідно до фундаментальної шкали оцінювання, що відображена в таблиці 2.

Таблиця 2

Фундаментальна шкала оцінок

Інтегрована оцінка ефективності I_0	Лінгвістична категорія ефективності
1,0 – 0,7	Висока
0,7 – 0,5	Добра
0,5 – 0,4	Задовільна
0,4 – 0,2	Низька
$\geq 0,2$	Незадовільна

ЕКСПЕРИМЕНТИ

У зв'язку з повномасштабним вторгненням та воєнними діями на території України, критично важливим є вибір безпечних та ефективних маршрутів для перевезень. Враховуючи підвищену небезпеку на Лівобережжі України, де спостерігаються активні бойові дії, руйнування транспортної інфраструктури та ризики артилерійських обстрілів, для експериментального дослідження було обрано маршрути, що проходять через Західну та Центральну частини України. Початковим пунктом кожного маршруту було обрано місто Львів, а кінцевим – місто Київ. Було розглянуто наступні маршрути, висвітлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Оцінювані маршрути

Позначення маршруту	Маршрут
R1	Львів – Тернопіль – Бердичів – Житомир – Коростишів – Київ
R2	Львів – Броди – Дубно – Рівне – Звягель – Житомир – Коростишів – Київ
R3	Львів – Тернопіль – Хмельницький – Старокостянтинів – Кустівці – Любар – Бердичів – Житомир – Коростишів – Київ
R4	Львів – Броди – Дубно – Рівне – Звягель – Коростень – Київ
R5	Львів – Тернопіль – Хмельницький – Вінниця – Бердичів – Житомир – Коростишів – Київ
R6	Львів – Тернопіль – Збараж – Ланівці – Ямпіль – Жемелинці – Теліжинці – Гриців – Любар – Махнівка – Ружин – Сквир – Біла Церква – Київ
R7	Львів – Тернопіль – Збараж – Ланівці – Ямпіль – Жемелинці – Теліжинці – Гриців – Любар – Бердичів – Житомир – Коростишів – Київ
R8	Львів – Кременець – Ямпіль – Жемелинці – Теліжинці – Гриців – Любар – Бердичів – Житомир – Коростишів – Київ
R9	Львів – Луцьк – Рівне – Звягель – Житомир – Коростишів – Київ
R10	Львів – Луцьк – Рівне – Звягель – Коростень – Київ

Маршрути відтворено у формі графа, використовуючи базу даних Neo4j, де вершини типу *:Location* відображають точки маршруту (населені пункти), а ребра типу *:ROUTE_TO* – зв'язки між точками (автомобільні дороги). Введено вершини типу *:Route*, які є унікальними для кожного маршруту, з'єднані з кожною вершиною маршруту типу *:Location* та призначені для того щоб зберігати дані узагальнені для маршруту в цілому. Графові представлення маршрутів показано на рисунку 1.

Маршрути представлені в різних кольорах на мапі, відображені на рисунку 2.

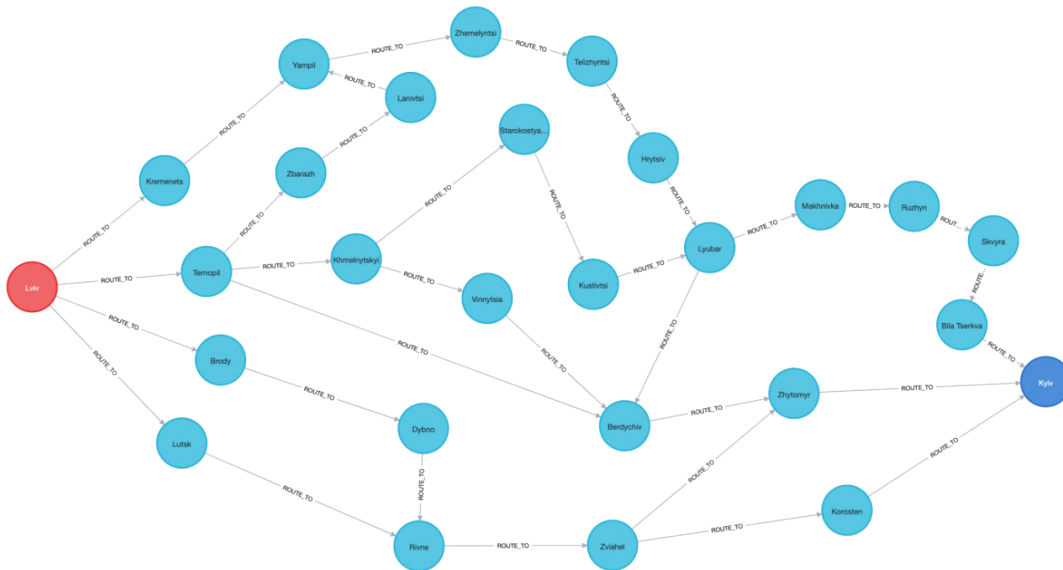


Рис. 1

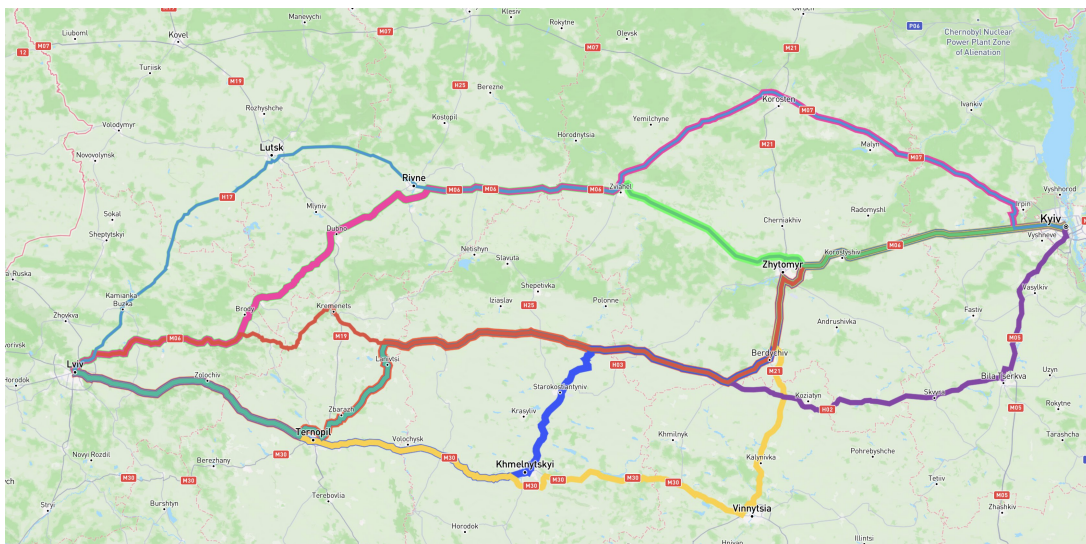


Рис. 2

Дані показників D, R, T, X, P, B, V, F маршрутів було отримано з публічного API openrouteservice (ORS) [16] та відображено в таблицях 4, 5.

Таблиця 4

Часткові показники маршрутів

Маршрут	Відстань маршруту, D, м	Час у дорозі, T, сек	Кількість залізничних переїздів, R	Кількість перехресть, світлофорів, X
R1	572821	30856	6	250
R2	540141	29209	1	323
R3	586978	31440	2	362
R4	561111	32317	2	301
R5	625541	33927	2	419
R6	593905	33108	7	281
R7	572822	30856	6	250
R8	562036	31503	5	220
R9	551221	30407	5	419
R10	572192	33514	6	397

Таблиця 5

Часткові показники маршрутів

Маршрут	Кількість проміжних населених пунктів, P	Кількість мостів та тунелів, B	Середня швидкість, V, км/год	Кількість АЗС, F
---------	--	--------------------------------	------------------------------	------------------

R1	46	67	67,76	54
R2	63	66	68,32	77
R3	48	65	68,15	61
R4	57	64	63,26	59
R5	59	67	67,33	83
R6	36	64	65,32	49
R7	46	67	67,85	54
R8	58	51	65,89	53
R9	64	56	67,16	81
R10	58	54	62,24	63

Значення показників Q та S були вираховані на основі інших даних. Розрахунок показника *індекс якості дорожнього покриття*, Q проводився за виразом:

$$Q_j = \frac{\sum_{i=0}^n q_i \times d_i}{\sum_{i=0}^n d_i} \quad (13)$$

де, q_i – якість дорожнього покриття отриманого з ORS [16] для сегменту i певного маршруту j , d_i – дистанція сегменту i певного маршруту j .

Розрахунок показника *індекс безпеки*, S проводився за виразом:

$$S_j = \frac{\sum_{i=0}^n s_i \times d_i}{\sum_{i=0}^n d_i} \quad (14)$$

де, s_i – індекс безпеки для області в якій пролягає певний сегмент i маршруту j , що має дистанцію – d_i .

При цьому s для кожної області обраховується згідно виразу:

$$s_i = \frac{e_i}{\sum_{i=0}^n e_i} \quad (15)$$

де e_i – кількість повідомлень про вибухи в області i , дані про які взято з електронного ресурсу [17].
Обраховані дані показників Q, S для маршрутів відображено в таблиці 6.

Таблиця 6

Показники маршрутів		
Маршрут	Індекс якості дорожнього покриття, Q	Індекс безпеки, S
R1	2,63	0,122
R2	3,07	0,101
R3	2,45	0,131
R4	2,98	0,113
R5	2,6	0,126
R6	2,36	0,109
R7	2,63	0,122
R8	2,59	0,127
R9	3,05	0,095
R10	2,96	0,107

Відповідно до всіх вищезазначених показників в графі було створено вершину типу :Route що є узагальненою моделлю маршруту та містить значення показників маршруту, наприклад, для маршруту R1 така вершина відображена на рисунку 3:

Node properties	
Route	
<elementId>	4:e2932dc6-747d-45c9-a46d-566fab9fb610:5
<id>	5
B	67
D	572821
F	54
P	46
Q	2.63
R	6
S	0.122
T	30856
V	67.76
X	250
index	0

Рис. 3

Представлення вершини населеного пункту типу *:Location* та ребра типу *:ROUTE_TO* в графі показано на рисунках 4 та 5 відповідно:

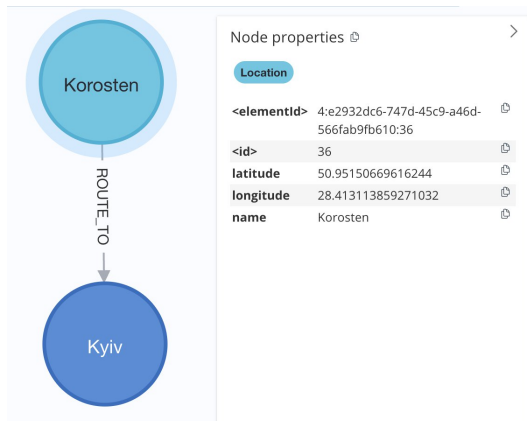


Рис. 4

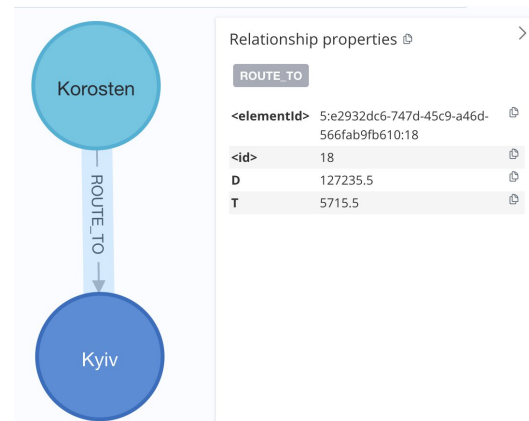


Рис. 5

Розрахунки узагальнених значень показників показано тільки для першої категорії критеріїв ефективності показників на прикладі маршруту R1. Обчислення для другої категорії критеріїв здійснюється за аналогією.

Відповідно до (5) проводимо нормування часткових критеріїв, для критеріїв що мінімізуються:

$$D_0 = \frac{572821}{5738768} = 0,099816023, \quad T_0 = \frac{30856}{5738768} = 0,097295491, \quad R_0 = \frac{6}{42} = 0,142857143,$$

$$X_0 = \frac{250}{3222} = 0,077591558, \quad P_0 = \frac{46}{535} = 0,085981308, \quad B_0 = \frac{67}{621} = 0,107890499$$

Відповідно до (6) проводимо нормування часткових критеріїв, для критеріїв що максимізуються:

$$V_0 = (67,76 \times 0,150909587)^{-1} = 0,097793451, \quad F_0 = (54 \times 0,162909621)^{-1} = 0,113673572,$$

$$Q_0 = (2,63 \times 3,690074182)^{-1} = 0,103040784, \quad S_0 = (0,122 \times 87,634523823)^{-1} = 0,093533016$$

Розрахунок узагальнених критеріїв ефективності за кожною групою виглядає наступним чином:

$$F_1 = (1-0,099816023)^{-1} + (1-0,097295491)^{-1} + (1-0,142857143)^{-1} + (1-0,077591558)^{-1} + (1-0,085981308)^{-1} + (1-0,107890499)^{-1} = 6,684459503$$

$$F_2 = (1-0,097793451)^{-1} + (1-0,113673572)^{-1} + (1-0,103040784)^{-1} + (1-0,093533016)^{-1} = 4,454708162$$

Максимальні та мінімальні значення мінімізуючого і максимізуючого критеріїв згруповано у формі абстрактного (найгіршого) маршруту M_A та відображені в таблиці 7.

Таблиця 7

Абстрактний (найгірший) маршрут

Показник	Маршрут	R_A
$\min D_0^{max}$		1,122337811
$\min T_0^{max}$		1,119794499
$\min R_0^{max}$		1,2
$\min X_0^{max}$		1,149482697
$\min P_0^{max}$		1,135881104
$\min B_0^{max}$		1,120938628
$F_{1 max}$		6,75294171
$\max Q_0^{min}$		1,09681922
$\max V_0^{min}$		1,107409736
$\max F_0^{min}$		1,079862646
$\max S_0^{min}$		1,095418731
$F_{2 max}$		4,502768625

Частинні критерії нормуються відносно максимальних (мінімальних) значень абстрактного маршруту R_A за виразами (9) та (10) та відображено в таблиці 8.

Таблиця 8

Частинні критерії нормовані відносно значень абстрактного маршруту

Показник	Маршрут	R_1
D_0^{max}		0,96402636
T_0^{max}		0,963461049
R_0^{max}		0,948509485
X_0^{max}		0,919147387
P_0^{max}		0,938405748
B_0^{max}		0,973934318
Q_0^{min}		0,956893331
V_0^{min}		0,97204612
F_0^{min}		0,930521009
S_0^{min}		0,965766904

Узагальнені критерії оптимальності нормовано за виразом (8) та відображені в таблиці 9.

Таблиця 9

Нормовані узагальнені критерії оптимальності

Маршрут	Критерій	F_1	F_2
R_1		0,845184898	0,849527853
R_2		0,834514825	0,856533832
R_3		0,837205064	0,852430073
R_4		0,836345566	0,851214048
R_5		0,846159651	0,859059757
R_6		0,848787333	0,840516758
R_7		0,845184925	0,849558892
R_8		0,839501804	0,848857952
R_9		0,851280121	0,855225343

R_{10}	0,853776358	0,850858054
----------	-------------	-------------

Сформовано інтегровані критерії оптимальності за виразом (7) та відображені в таблиці 10.

Таблиця 10

Інтегровані критерії оптимальності		
Маршрут	Критерій	I
	R_1	13,105066361
	R_2	13,013121823
	R_3	12,919145644
	R_4	12,831500969
	R_5	13,595450854
	R_6	12,883453849
	R_7	13,106438638
	R_8	12,846892135
	R_9	13,631336923
	R_{10}	13,543861177

Оскільки вимога мінімізації виконується до інтегрованого критерію маршруту R_4 , цей маршрут вважається оптимальним. Для оцінювання достовірності встановленого оптимального маршруту R_4 , визначено показник $\max I$, згідно з виразом (12), найгіршого варіанта оцінювання ефективності системи загалом:

$$\max I = (1 - [0,853776358 - 0,03])^{-1} + (1 - [0,859059757 - 0,03])^{-1} = 11.524605031$$

Відповідно до $\max I$ нормовано значення інтегрованого критерію за виразом (11). Результати розрахунків наведено в таблиці 11.

Таблиця 11

Нормовані значення інтегрованої оцінки оптимальності		
Маршрут	Критерій	I_0
	R_1	0,879400738
	R_2	0,885614166
	R_3	0,892056282
	R_4	0,89814941
	R_5	0,847680975
	R_6	0,894527598
	R_7	0,879308663
	R_8	0,897073386
	R_9	0,845449357
	R_{10}	0,850909861

За результатами розрахунків маршрути розподілено за лінгвістичними категоріями та відображено в таблиці 12.

Таблиця 12

Розподіл маршрутів за лінгвістичними категоріями		
Інтегрована оцінка ефективності I_0	Лінгвістична категорія ефективності	Маршрут
1,0 – 0,7	Висока	$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10}$
0,7 – 0,5	Добра	
0,5 – 0,4	Задовільна	
0,4 – 0,2	Низька	
$\geq 0,2$	Незадовільна	

Оскільки інтегрована оцінка ефективності маршруту R_4 відноситься до лінгвістичної категорії «Висока» з найвищим пріоритетом серед інших маршрутів вважається, що оптимальність маршруту встановлено достовірно.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В результаті проведеного дослідження було розроблено інфологічну модель факторів, показників та критеріїв оптимальності маршрутів перевезень, що забезпечує багатокритеріальне оцінювання ефективності транспортних маршрутів із використанням графових баз даних. Виявлено, що традиційні підходи не здатні повною мірою врахувати суперечливі критерії оптимізації, такі як витрати, час, безпека та якість дорожнього покриття. Це обґрунтовує необхідність використання багатокритеріального підходу та методів агрегації, зокрема нелінійної схеми компромісів професора Вороніна.

На основі сформованих критеріїв запропоновано метод із використанням вкладених згорток, що дозволяє інтегрувати часткові показники до єдиного узагальненого критерію ефективності. У дослідженні проведено нормування показників, розроблено механізм формування абстрактного (найгіршого) маршруту та оцінювання маршрутів відносно нього, що підвищує достовірність вибору оптимального рішення.

Наукова новизна дослідження полягає у впровадженні багаторівневої моделі оцінювання ефективності транспортних маршрутів, реалізованої в середовищі графової бази даних Neo4j. Запропоновано графову структуру, що дозволяє адаптивно зберігати та обробляти показники маршрутів, здійснюючи ефективний пошук та оцінку альтернатив.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження розробленої моделі в системи логістичного планування для оптимізації вантажних перевезень, зокрема в умовах обмеженого доступу до інфраструктури під час воєнного стану. Застосування підходу дозволяє враховувати індекси безпеки територій, які базуються на даних про вибухи та обстріли, що є критично важливим в сучасних умовах.

Перспективи подальших досліджень включають удосконалення методів агрегації критеріїв, інтеграцію реального часу даних у модель, розширення типів оцінюваних параметрів та адаптацію моделі до інших типів транспортних систем (залізничного, водного, повітряного транспорту).

Література

1. Малеева В. В., Набокін Д. А., Малеева Ю. А. Вибір найбільш ефективного маршруту перевезень з урахуванням індексів небезпечності територій в умовах воєнного часу. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2024. № 3. С. 141–145. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.3.141.
2. Волохова І. В., Волохов В. А., Лук'янова О. М. Фактори впливу на логістичне забезпечення України в умовах війни. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2022. (Необхідно вказати номер випуску та сторінки, якщо це журнальна стаття).
3. Мамчин М. М., Михаць А. Р., Демко М. Я. Вплив воєнного стану на логістичну діяльність в Україні. *Ефективна економіка*. 2024. № 6. DOI: 10.32702/2307-2105-2024.6.4043. (Якщо це електронний журнал, можна додати URL та дату звернення).
4. Liu X., Cats O., Van Nes R. Exploring the use of time-varying graphs for modelling transit networks. *Public Transport*. 2018. Vol. 10, No. 1. P. 183–210. DOI: 10.1007/s12469-018-0178-5.
5. Гурч Л. М. Маршрутизація перевезень з використанням новітніх технологій. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Логістика*. 2016. № 846. С. 48–53. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPL_2016_846_11.
6. Бутко Т. В., Пархоменко Л. О., Тарасов К. О. Формалізація процедури надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам на основі ризик-менеджменту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 1. С. 31–37. DOI: 10.18664/ikszt.v28i1.276341.
7. Гужевська Л. А., Даниленко І. В. Формування розвізно-збірних маршрутів методом Кларка-Райта при доставці експрес-відправлень. *Вісник Національного транспортного університету*. 2016. № 1. С. 122–129. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2016_1_17.
8. Шарай С. М., Сахно В. П., Поляков В. М., Рой М. П., Фадєєв М. С. Використання моделі нейронної мережі для формування маршруту перевезень вантажів та вибору виду транспорту. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали XI Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. (м. Вінниця, 13–14 квітня 2023 р.)*. Вінниця, 2023. С. 354–357. URL: <https://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2023.pdf>.
9. Коробкова О. М. Логістична діяльність підприємств в умовах воєнного стану. *Actual problems of modern science : The 4th International scientific and practical conference (Boston, USA, January 31 – February 3, 2023)*. Boston : International Science Group, 2023. P. 457–458. URL: <https://isgkonf.com/wp-content/uploads/2023/01/Actual-problems-of-modern-science.pdf#page=458>. (Посилання з web.archive.org було замінено на пряме, якщо воно активне; якщо ні – повернути архівне).

10. Szucs G. Decision support for route search and optimum finding in transport networks under uncertainty. *Journal of Applied Research and Technology*. 2015. Vol. 13. P. 125–134. DOI: 10.1016/S1665-6423(15)30011-0.
11. Воронін А. М., Колос Л. Н., Підгородецька Л. В. Методика багатокритеріальної оцінки ефективності наукових космічних проєктів. *Проблеми управління та інформатики*. 2004. № 5. С. 46–56.
12. Воронін А. М. Нелінійна схема компромісів у багатокритеріальних задачах оцінювання та оптимізації. *Кібернетика та системний аналіз*. 2009. Т. 45, № 4. С. 106–114.
13. Воронін А. М. Багатокритеріальний розподіл обмежених ресурсів. *Проблеми управління та інформатики*. 2010. № 4. С. 143–150.
14. Даник Ю. Г., Писарчук О. О., Шестаков В. І. та ін. *Багатокритерійні математичні моделі ситуаційного управління та самоорганізації у складних інформаційних системах*. Житомир : ЖБИ, 2016. 232 с.
15. Харченко В. П., Писарчук О. О. *Нелінійне та багатокритеріальне моделювання процесів у системах керування рухом : монографія*. Київ : Ін-т обдарованої дитини, 2015. 248 с.
16. openrouteservice. URL: <https://openrouteservice.org/> (дата звернення: 20.03.2025). (Назва ресурсу написана з маленької літери, як в оригіналі. Якщо це назва організації, можливо, варто писати з великої: Openrouteservice).
17. Статистика повітряних тривог. URL: <https://air-alarms.in.ua/> (дата звернення: 20.03.2025).

References

1. Malieieva, V. V., Nabokin, D. A., & Malieieva, Y. A. (2024). Choosing the most effective transportation route considering territory danger indices in wartime conditions. *Control, Navigation and Communication Systems. Collected scientific papers*, (3), 141–145. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.3.141.
2. Volokhova, I. V., Volokhov, V. A., & Lukianova, O. M. (2022). Factors influencing logistical support in Ukraine under war conditions. *Herald of Transport and Industry Economics*. (Issue number and page numbers should be specified if this is a journal article).
3. Mamchyn, M. M., Mykhats, A. R., & Demko, M. Y. (2024). The impact of martial law on logistical activities in Ukraine. *Effective Economy*, (6). DOI: 10.32702/2307-2105-2024.6.4043. (If this is an electronic journal, a URL and access date could be added).
4. Liu, X., Cats, O., & Van Nes, R. (2018). Exploring the use of time-varying graphs for modelling transit networks. *Public Transport*, 10(1), 183–210. DOI: 10.1007/s12469-018-0178-5.
5. Hurch, L. M. (2016). Transportation routing using new technologies. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Logistics Series*, (846), 48–53. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPL_2016_846_11.
6. Butko, T. V., Parkhomenko, L. O., & Tarasov, K. O. (2023). Formalization of the procedure for providing an alternative route for high-speed passenger trains based on risk management. *Information and Control Systems in Railway Transport*, 28(1), 31–37. DOI: 10.18664/ikszt.v28i1.276341.
7. Huzhevska, L. A., & Danylenko, I. V. (2016). Formation of delivery and collection routes by the Clarke-Wright method for express shipments. *Bulletin of the National Transport University*, (1), 122–129. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2016_1_17.
8. Sharai, S. M., Sakhno, V. P., Poliakov, V. M., Roi, M. P., & Fadiev, M. S. (2023). Using a neural network model for forming freight transportation routes and selecting transport modes. *Problems and prospects of road transport development: Proceedings of the XI International Scientific and Technical Internet Conference (Vinnytsia, April 13–14, 2023)* (pp. 354–357). Vinnytsia. URL: <https://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2023.pdf>.
9. Korobkova, O. M. (2023). Logistical activities of enterprises under martial law. *Actual problems of modern science: The 4th International scientific and practical conference (Boston, USA, January 31 – February 3, 2023)* (pp. 457–458). Boston: International Science Group. URL: <https://isgkonf.com/wp-content/uploads/2023/01/Actual-problems-of-modern-science.pdf#page=458>.
10. Szucs, G. (2015). Decision support for route search and optimum finding in transport networks under uncertainty. *Journal of Applied Research and Technology*, 13, 125–134. DOI: 10.1016/S1665-6423(15)30011-0.
11. Voronin, A. M., Kolos, L. N., & Pidhorodetska, L. V. (2004). Methodology for multi-criteria evaluation of the effectiveness of scientific space projects. *Problems of Control and Informatics*, (5), 46–56.
12. Voronin, A. M. (2009). Nonlinear compromise scheme in multi-criteria evaluation and optimization problems. *Cybernetics and Systems Analysis*, 45(4), 106–114.
13. Voronin, A. M. (2010). Multi-criteria distribution of limited resources. *Problems of Control and Informatics*, (4), 143–150.
14. Danyk, Y. H., Pysarchuk, O. O., Shestakov, V. I., et al. (2016). *Multi-criteria mathematical models of situational management and self-organization in complex information systems*. Zhytomyr: ZhVI. 232 p.
15. Kharchenko, V. P., & Pysarchuk, O. O. (2015). *Nonlinear and multi-criteria modeling of processes in traffic control systems: monograph*. Kyiv: Institute of the Gifted Child. 248 p.
16. openrouteservice. URL: <https://openrouteservice.org/> (accessed: March 20, 2025).
17. Air Raid Statistics. URL: <https://air-alarms.in.ua/> (accessed: March 20, 2025).